

# 一种判断无线网络节点定位翻转模糊的新方法

刘 伟,董恩清,张德敬,宋 洋,钱 鹏,郑清彬

(山东大学(威海)机电与信息工程学院,山东威海 264209)

**摘 要:** 为了解决基于测距的无线网络节点定位中可能会发生翻转模糊的问题,已经有研究者证明了将节点翻转模糊问题等价为判断是否存在一条直线和所有参考节点的测距误差圆都相交的问题(Existence of Intersecting Line, EIL).在测距误差圆半径相等的情况下,EIL问题可采用凸包方法,其计算复杂度较低;而在测距误差圆半径不等的情况下,采用公切线翻转模糊检测法的计算复杂度较高.为了解决 EIL 问题中测距误差圆半径不等时计算复杂度较高的缺陷,本文采用正交投影方法证明了 EIL 问题的实质是判断是否存在一条直线,使任意两个测距误差圆在这条直线的正交投影线段有重叠,这条直线与 EIL 问题中的直线相垂直.根据该证明,文中提出了一种基于正交投影的节点翻转模糊检测方法.该方法通过简单的坐标变换就能代替 EIL 问题中求解公切线的复杂计算过程.仿真结果表明,本文提出的基于正交投影的翻转模糊检测方法和 Wang 提出的公切线翻转模糊检测方法相比,大大降低了计算复杂度,但检测结果和平均定位误差是等价的.

**关键词:** 无线网络;节点定位;翻转模糊;正交投影

**中图分类号:** TP212; TN92

**文献标识码:** A

**文章编号:** 0372-2112 (2015)06-1218-06

**电子学报 URL:** <http://www.ejournal.org.cn>

**DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2015.06.027

## A New Flip Ambiguity Detection Algorithm in Wireless Networks Node Localization

LIU Wei, DONG En-qing, ZHANG De-jing, SONG Yang, QIAN Peng, ZHENG Qing-bin

(School of Mechanical, Electrical & Information Engineering, Shandong University, Weihai, Shandong 264209, China)

**Abstract:** To detect flip ambiguity in range-based wireless network node localization, some researchers proposed that the flip ambiguity detection is equal to determine whether there is a straight line intersecting with all range error circles of the reference nodes. It is called the existence of intersecting line (EIL) problem. To solve the EIL problem under equal radii, a convex hull algorithm with low computational complexity was proposed. However, for unequal radii, a common tangent algorithm (CTA) has high computational complexity. In order to address the high computational complexity of CTA, we prove that the EIL problem is equal to determine whether there is a straight line, which enables any two circles to have overlapping orthogonal projection onto the line. According to this proof, we propose an orthogonal projection algorithm (OPA) to detect nodes flip ambiguities with unequal radii. The algorithm uses the coordinate transformation to simplify the computation process. The simulation results demonstrate that OPA and CTA have exactly the same detection results, but the computational complexity is greatly reduced.

**Key words:** wireless networks; node localization; flip ambiguity; orthogonal projection

## 1 引言

节点定位技术<sup>[1~6]</sup>在无线网络的实际应用中具有非常重要的意义.无线网络节点的定位过程就是未知节点通过与锚节点(事先知道自身位置的节点)或已经完成定位的未知节点通信,获得相关信息并采用一定的定位算法估计出自身位置的过程.目前节点定位方法通常可以划分为基于测距和基于非测距的两种方法<sup>[7]</sup>.其中

基于测距的方法,由于定位精度高在无线网络节点定位中被广泛采用.不过该方法存在从已知的数据所估计出的位置信息的非唯一性问题<sup>[8,9]</sup>,也就是在定位中将出现节点的翻转模糊<sup>[10]</sup>.而且,基于测距的定位方法在实际定位中,如果发生翻转模糊,就可能产生节点定位的雪崩效应,导致整个网络节点的定位失效.因此,有必要采取一定的措施去判断节点翻转模糊是否会发生,从而减小其对整个网络定位过程的影响.

目前主要采用鲁棒四边形的方法来判断节点定位的翻转模糊问题<sup>[11,12]</sup>. 该类方法通过判断未知节点和三个参考节点(包括邻居锚节点和已完成定位的邻居节点)组成的一个四边形是否满足一定的几何条件,来确定未知节点的定位不发生翻转模糊的鲁棒性. 文献[13]对四边形进行几何分析,量化其满足鲁棒性的概率分布. 在实际定位中,未知节点到参考节点的三个测量距离均存在误差,而文献[11~13]中的鲁棒四边形方法在理论分析时仅假设其中的一个测距有误差,另外两个测距是精确的,这是不符合实际情况的. 为此文献[14]对三个测距均有误差的情况进行了理论分析,提出了一种改进算法. 文献[15]则通过增加一个参考节点的方式来组成四个四边形,然后采用文献[14]中的方法判断这四个四边形的鲁棒性,只有当这些四边形全部满足鲁棒性才能认为未知节点在定位时不会发生翻转模糊.

判断节点翻转模糊的鲁棒四边形方法大多数只适用于采用三个参考节点的三边定位. 相对于三边定位方法,使用多于三个参考节点的多边定位方法更能得到较小的平均定位误差,因此在基于测距的无线网络的节点定位中,大多采用多边定位方法. 目前针对多边定位中节点翻转模糊问题的研究还是非常少,虽然文献[14]首次提出了一种适合于多边定位的鲁棒四边形方法,但是其计算复杂度大,而且判断效果较差. 文献[16]将翻转模糊问题等价为判断是否存在一条直线和若干圆(以参考节点为圆心,以参考节点到未知节点的测距误差绝对值的最大值为半径)都相交(Existence of Intersecting Line, EIL)问题. 该方法不仅适合于多边定位,而且判断效果较好. EIL 问题划分半径相等和半径不等两种情况进行讨论. 在文献[16]中,对于半径相等的情况,所采用的凸包方法具有较低的计算复杂度,而对于半径不等的情况,采用的公切线方法的计算复杂度则较高.

为了解决 EIL 问题中半径不等的情况下,文献[16]的方法计算复杂度较高的缺陷,本文采用正交投影理论对 EIL 问题进行表示,证明了该问题实际上可以等价为在空间中存在某一直线,如任意两个圆在该直线的正交投影线段有重叠部分,就认为可能存在节点翻转模糊. 根据该结论,本文进而提出了一种基于正交投影解决翻转模糊问题的方法. 由于该方法将 EIL 问题转化为一个角度计算问题,可以用坐标变换的方式简化计算过程,经过分析该方法的计算复杂度仅为  $O(k^2)$ ,而公切线法的计算复杂度为  $O(k^3)$ . 通过进一步的仿真结果说明了基于正交投影方法和公切线方法的判断结果是等价的.

## 2 节点定位的翻转模糊和 EIL 问题

### 2.1 节点定位的翻转模糊问题<sup>[10]</sup>

节点定位的翻转模糊问题的发生指的是当参考节点间的位置几乎共线时,由于测距误差的存在,导致未知节点的定位存在两个关于某一条直线成镜像关系的估计位置. 图 1 中节点  $A$ 、 $B$  和  $C$  是位置已知的参考节点,  $\tilde{d}_{ad}$ 、 $\tilde{d}_{bd}$  和  $\tilde{d}_{cd}$  分别是它们到未知节点的测量距离. 以  $B$ 、 $C$  两点为圆心,分别以  $\tilde{d}_{bd}$  和  $\tilde{d}_{cd}$  为半径画两个圆. 未知节点的位置必然在两圆的交点  $D$  或  $D'$  上,且关于直线  $BC$  对称. 假设待定位的未知节点位置为  $D$ ,  $A$  到  $D$  和  $D'$  两点的距离分别为  $d_{ad}$  和  $d'_{ad}$ . 测量距离  $\tilde{d}_{ad}$  用来选择未知节点的估计位置,其选择的标准是  $\tilde{d}_{ad}$  更接近  $d_{ad}$  (选择  $D$ ) 还是更接近  $d'_{ad}$  (选择  $D'$ ). 当  $A$ 、 $B$ 、 $C$  三点几乎共线时,  $d_{ad}$  和  $d'_{ad}$  相差不大,由于测距误差的存在,就有可能错误地选择  $D'$  作为未知节点  $D$  的估计位置. 如果做出错误的选择,且让这种错误定位的未知节点参与其它未知节点的定位,可能导致整个网络节点的定位失效.

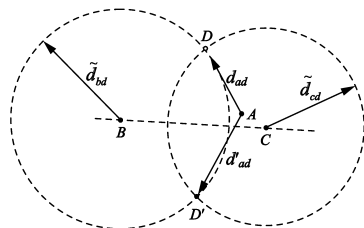


图1 节点的翻转模糊示意图

### 2.2 EIL 问题<sup>[16]</sup>

无线传感器网络的多边定位方法需用  $k$  ( $k \geq 3$ ) 个参考节点来定位一个未知节点. 已知数据可以用一个集合  $M = \{\langle p_i, \tilde{d}_i \rangle\}$ ,  $i = 1, 2, \dots, k$  表示, 其中,  $p_i$  表示第  $i$  个参考节点的位置,  $\tilde{d}_i$  表示第  $i$  个参考节点到未知节点的测量距离.  $\tilde{d}_i = d_i + \epsilon_i$ , 其中  $d_i$  和  $\epsilon_i$  分别表示第  $i$  个参考节点到未知节点的真实距离和测距误差. 如图 2 所示, 将每个参考节点沿着各自的测距方向平移  $\epsilon_i$  至一个新的位置  $\tilde{p}_i$ , 可以得到另一个集合  $M' = \{\langle \tilde{p}_i, d_i \rangle\}$ . 与集合  $M$  不同, 集合  $M'$  没有测距误差. 因此, 在集合  $M'$  中, 如果平移后的  $k$  个节点位置  $\tilde{p}_i$  不共线, 那么, 在未知节点的定位过程中肯定不会发生翻转模糊.

在实际情况下, 测距误差  $\epsilon_i$  是未知的, 所以无法求出参考节点平移后的位置  $\tilde{p}_i$ . 不过  $\epsilon_i$  的取值是有界限的, 故可以求出  $\tilde{p}_i$  所处的区域范围. 若  $\delta_i$  表示未知节点到第  $i$  个参考节点测距误差绝对值的最大值, 即  $\delta_i = \max |\epsilon_i|$ ,  $i = 1, 2, \dots, k$ . 那么, 如图 2 所示,  $\tilde{p}_i$  必然在以  $p_i$  为圆心,  $\delta_i$  为半径的圆内. 可以用集合  $S = \{\langle p_i, \delta_i \rangle\}$ ,  $i$



$$|(x_m - x_n)\cos\theta + (y_m - y_n)\sin\theta| \leq r_m + r_n \quad (1)$$

$$(m = 1, 2, \dots, k; n = 1, 2, \dots, k; m \neq n)$$

式(1)表示的是包含  $g = k(k-1)/2$  个不等式的不等式组. 假设:

$$c_j = x_m - x_n, \quad d_j = y_m - y_n,$$

$$e_j = r_m + r_n, \quad j = 1, 2, \dots, g$$

式(1)可简化为:

$$|c_j \cos\theta + d_j \sin\theta| \leq e_j, \quad j = 1, 2, \dots, g \quad (2)$$

由式(2)和初始条件  $0 \leq \theta < \pi$ , 可以得到:

$$\theta \in \left( \bigcap_{j=1}^g A_j \right) \cup \left( \bigcap_{j=1}^g B_j \right) \cap [0, \pi) \quad (3)$$

其中:

$$A_j = \left[ -\arcsin \frac{e_j}{\sqrt{c_j^2 + d_j^2}} - \arctan \frac{c_j}{d_j}, \right. \\ \left. \arcsin \frac{e_j}{\sqrt{c_j^2 + d_j^2}} - \arctan \frac{c_j}{d_j} \right] \\ B_j = \left[ \pi - \arcsin \frac{e_j}{\sqrt{c_j^2 + d_j^2}} - \arctan \frac{c_j}{d_j}, \right. \\ \left. \pi + \arcsin \frac{e_j}{\sqrt{c_j^2 + d_j^2}} - \arctan \frac{c_j}{d_j} \right]$$

当式(3)所表示的集合为空集时, 不等式组(1)无解, 此时, 空间中不存在和这  $k$  个圆都相交的直线, 节点不会发生翻转模糊; 否则, 空间中存在直线和这  $k$  个圆都相交, 节点有可能发生翻转模糊.

对集合 EIL 问题中的每一对圆, 基于正交投影法都要按照式(1)列出一个不等式, 然后对其求解. 所以, 基于正交投影法的计算复杂度为  $O(k^2)$ . 而公切线法首先需要计算每对圆的公切线, 然后再判断公切线与其余的圆是否相交, 所以公切线法的计算复杂度为  $O(k^3)$ . 相比之下, 对于解决各圆半径不等的 EIL 问题, 本文提出的基于正交投影的节点翻转模糊检测方法的计算复杂度明显降低.

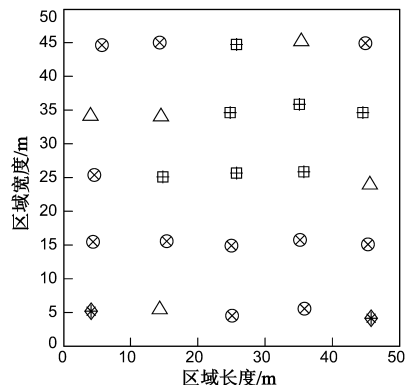
## 4 仿真分析

为了验证提出的基于正交投影节点翻转模糊检测方法的性能, 我们对其进行了仿真分析. 仿真采用的测距方法是 RSSI (Received Signal Strength Indication), 其测距误差<sup>[17]</sup>可以表示为  $e = d \times 10^{\sigma/10n}$ , 其中  $e$  表示测距误差,  $d$  表示节点间的真实距离,  $n$  为路径损耗指数(文中设定为 4),  $\sigma$  表示高斯白噪声(文中均值为 0, 标准差为 4). 可以看出, RSSI 方法的测距误差和真实距离有关, 适用于半径不等的 EIL 问题.

### 4.1 检测结果的对比分析

我们在边长为 50m 的正方形网络区域中放置了 25 个节点, 其中 5 个为锚节点. 仿真的节点分布分别为均

匀分布和随机分布两种类型. 均匀分布时, 节点间距离是 10m(存在 0~2m 的随机误差). 图 5 和图 6 分别是节点均匀分布和随机分布时两种方法检测结果的对比图. 从中可以看出, 对于不同节点分布, 提出的基于正交投影翻转模糊检测方法和公切线翻转模糊检测方法的检测结果是完全一致的.



△ 锚节点  
+ 基于正交投影检测不会发生翻转模糊的节点  
× 基于正交投影检测可能发生翻转模糊的节点  
\* 基于正交投影检测无法定位的节点  
□ 公切线检测不会发生翻转模糊的节点  
○ 公切线检测可能发生翻转模糊的节点  
◇ 公切线检测无法定位的节点

图5 节点均匀分布检测结果对比图

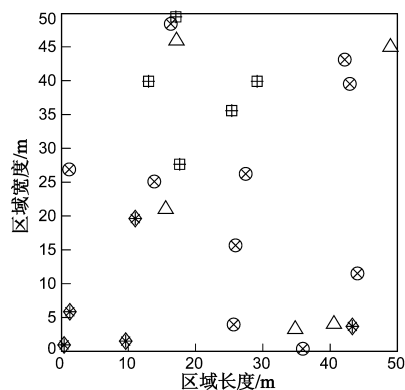


图6 节点随机分布检测结果对比图(图例与图5中的图例相同)

### 4.2 平均定位误差对比分析

下面, 我们在节点定位的过程中分别加入基于正交投影翻转模糊检测和公切线翻转模糊检测, 对定位后得到的平均定位误差进行仿真对比分析. 目前, 对于检测出在定位中有可能发生翻转模糊的未知节点, 有两种处理方式. 一种是大多数采用的悲观处理方式, 即直接不对该未知节点进行定位, 从而防止其影响后续未知节点的定位精度<sup>[8,10,16]</sup>; 另外一种称为乐观的处理方式, 就是对于有可能发生翻转模糊的未知节点, 采用其它的一些附加信息(如节点之间的连通性等)进一步判断和进行节点位置估计<sup>[18,19]</sup>. 本文我们主要是说明

提出的新的节点翻转模糊检测方法在计算复杂度方面的优势,所以仿真中采用相对简单的悲观的处理方式.

圆的数量和各圆的半径是 EIL 问题中的两个主要的变量,它们在无线传感器网络节点定位问题中分别等价于节点的通信半径和单位检测误差.因此,为了研究这两个变量对提出的基于正交投影检测方法和公切线检测方法进行翻转模糊判断的影响,我们分别采用不同节点通信半径和不同的单位检测误差仿真分析网络的平均定位误差的变化.文中的平均定位误差采用式(4)计算:

$$e = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \frac{\sum_{i \in V_n} \sqrt{(x_i - \hat{x})^2 + (y_i - \hat{y})^2}}{|V_n| R} \times 100\%$$

(4)

式(4)中, $e$ 表示平均定位误差, $N$ 表示仿真的网络数目(文中为100个), $(x_i, y_i)$ 和 $(\hat{x}_i, \hat{y}_i)$ 分别表示节点*i*的真实坐标和估计坐标, $V_n$ 表示在第*n*个网络中能够定位的节点的集合, $|V_n|$ 表示集合*V<sub>n</sub>*中节点的数量, $R$ 表示通信半径.

我们在边长为100m的正方形网络区域中放置了100个节点,其中10个为锚节点.仿真中节点分布同样分别采用均匀分布和随机分布.均匀分布时,节点间距离是10m(存在0~2m的随机误差).图7和图8分别表示通信半径和单位检测误差与平均定位误差的关系.其中,图7中单位检测误差为0.5m,图8中通信半径为50m.从图7和图8中可以看出,两种节点分布下,本文提出的基于正交投影翻转模糊检测方法和公切线翻转模糊检测方法进行翻转模糊判断得到的平均定位误差曲线是完全重合的,这就进一步证明了两种方法的判断结果是相同的.另外,还可以看出,与不进行任何翻转模糊检测相比,加入翻转模糊检测后,由于去除了有可能发生翻转模糊的节点引入的高定位误差,而且避免了翻转模糊节点对其它未知节点定位的影响,所以得到的平均定位误差明显更小,也就是相对提高了整体网络节点的定位精度.

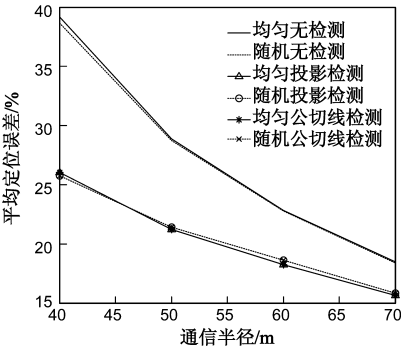


图7 通信半径与平均定位误差的关系

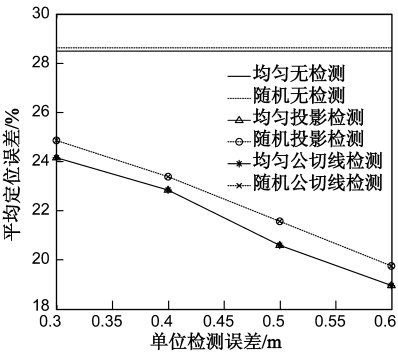


图8 单位检测误差与平均定位误差的关系

4.3 计算时间的对比分析

为了比较提出的基于正交投影翻转模糊检测方法和公切线翻转模糊检测方法的计算复杂度,我们对它们的计算时间进行了仿真,仿真采用4.2节中不同通信半径的网络及其参数.

表1和表2分别是节点为均匀分布和随机分布时,100个不同网络仿真的计算时间平均值.在表中, $R$ 和 $N$ 分别表示节点的通信半径和参考节点的平均数, $T_{CTA}$ 和 $T_{OPA}$ 分别表示公切线翻转模糊检测方法和基于正交投影翻转模糊检测方法判断一次所需的平均时间, $\beta$ 表示两者的比值( $\beta = T_{CTA}/T_{OPA}$ ).从表中可以看出,对于两种节点分布,基于正交投影检测方法判断一次所需的平均时间要小于公切线检测方法,而且随着参考节点数量的增加,两者所需时间的比值越来越大,因此,当参考节点数量较多时,基于正交投影检测方法明显地更适用.这就说明了与公切线检测方法相比,本文提出的基于正交投影翻转模糊检测方法在取得了相同判断结果的同时,大大降低了计算复杂度.

表1 节点均匀分布时间对比

$R(m)$	40	50	60	70
$N$	6.347	6.843	7.248	8.258
$T_{CTA}(ms)$	0.733	0.880	0.966	1.354
$T_{OPA}(ms)$	0.203	0.243	0.250	0.254
$\beta$	3.606	3.614	3.863	5.330

表2 节点随机分布时间对比

$R(m)$	40	50	60	70
$N$	5.254	6.228	7.059	8.072
$T_{CTA}(ms)$	0.689	0.742	0.854	1.138
$T_{OPA}(ms)$	0.203	0.228	0.251	0.292
$\beta$	3.295	3.328	3.794	4.964

5 结论

节点的翻转模糊是基于测距的无线网络节点定位过程中需要解决的一个关键问题,而将翻转模糊等价于EIL问题是目前效果较好的方法.针对EIL问题现有

的计算方法在测距误差圆半径不等时计算复杂度较大的缺陷,本文提出了一种新的基于正交投影节点翻转模糊检测方法,并经过理论分析和大量数据仿真证明了本文提出的方法与 Wang 等人提出的公切线翻转模糊检测方法的检测结果是等价的,但计算复杂度得到大幅度降低。

## 参考文献

- [1] 李东岳,王英龙,魏诺,等.信号强度和运动向量结合的无线传感器网络移动节点定位[J].电子学报,2010,38(z1): 221 – 224.  
Li Dong-yue, Wang Ying-long, Wei Nuo, et al. Localization algorithm for mobile nodes in wireless sensor networks based on single strength and motion vector[J]. Acta Electronica Sinica, 2010, 38(z1): 221 – 224. (in Chinese)
- [2] 陈桂忠,董利达.基于位姿评估的无线传感器网络自主移动节点定位技术[J].电子学报,2008,36(12):2428 – 2432.  
Chen Gui-zhong, Dong Li-da. A novel localization algorithm for mobile sensor node[J]. Acta Electronica Sinica, 2008, 36(12): 2428 – 2432. (in Chinese)
- [3] W Kim, J Park, et al. Target localization using ensemble support vector regression in wireless sensor networks [J]. IEEE Transactions on Cybernetics, 2012, 43(4): 1189 – 1198.
- [4] J A Jiang, X Y Zheng, et al. A distributed RSS-based localization using a dynamic circle expanding mechanism [J]. IEEE Sensors Journal, 2013, 13(10): 3754 – 3766.
- [5] Y Z Chai, E Q Dong. A three-dimensional localization algorithm for wireless sensor networks based on the BFGS optimization [A]. Proceedings of the 11th European Wireless Conference [C]. Vienna: EW, 2011. 1 – 5.
- [6] E Q Dong, Y Z Chai, et al. A novel three-dimensional localization algorithm for wireless sensor networks based on particle swarm optimization [A]. Proceedings of the 18th International Conference on Telecommunications [C]. Ayia Napa: ICT, 2011. 50 – 60.
- [7] Q J Shi, C He, et al. Distributed wireless sensor network localization via sequential greedy optimization algorithm [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2010, 58(6): 3328 – 3340.
- [8] J Aspnes, T Eren, et al. A theory of network localization [J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2006, 5(12): 1663 – 1678.
- [9] R Connelly. Generic global rigidity [J]. Discrete and Computational Geometry, 2005, 33(4): 549 – 563.
- [10] A Kannan, B Fidan, et al. Use of flip ambiguity probabilities in robust sensor network localization [J]. Wireless Networks, 2011, 17(5): 1157 – 1171.
- [11] D Moore, J Leonard, et al. Robust distributed network localization with noisy range measurements [A]. Proceedings of the 2nd ACM Conf on Embedded Networked Sensor Systems [C]. New York: ACM, 2004. 50 – 61.
- [12] F Sittile, M Spirito. Robust localization for wireless sensor networks [A]. Proceedings of the 5th Annual IEEE Communications Society Conference on Sensor, Mesh and Ad Hoc Communications and Networks [C]. San Francisco: IEEE SECON, 2008. 46 – 54.
- [13] A Kannan, B Fidan, et al. Analysis of flip ambiguities in distributed network localization [A]. Proceedings of Information, Decision and Control [C]. Adelaide: IDC, 2007. 193 – 198.
- [14] A Kannan, B Fidan, et al. Analysis of flip ambiguities for robust sensor network localization [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2010, 59(4): 2057 – 2070.
- [15] D S Chen, X Y Li, et al. An improved quadrilateral localization algorithm for wireless sensor networks [A]. Proceedings of IEEE/ICME International Conference on Complex Medical Engineering [C]. Harbin: CME, 2011. 268 – 273.
- [16] X P Wang, Z Yang, et al. Beyond rigidity: obtain localizability with noisy ranging measurement [J]. International Journal of Ad Hoc and Ubiquitous Computing: Special Issue on Wireless Network Algorithm and Theory, 2011, 8(1): 114 – 124.
- [17] M Rahman, L Kleeman. Paired measurement localization: a robust approach for wireless localization [J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2009, 8(8): 1087 – 1102.
- [18] S Severi, G Abreu, et al. Understanding and solving flip-ambiguity in network localization via semidefinite programming [A]. Proceedings of Global Telecommunications Conference [C]. Honolulu: IEEE GLOBECOM, 2009. 1 – 6.
- [19] X P Wang, Y H Yang, et al. OFA: An optimistic approach to conquer flip ambiguity in network localization [J]. Computer Networks, 2013, 57(6): 1529 – 1544.

## 作者简介



刘 伟 男, 1979 年出生于山东兖州. 2009 年于昆明理工大学获得硕士学位, 2010 年起于山东大学攻读博士学位, 主要研究方向为无线传感器网络节点定位技术.

E-mail: lwsdjnyz@163.com



董恩清(通信作者) 男, 1965 年出生于辽宁营口, 博士, 山东大学(威海)教授、博士生导师. 2002 年于西安交通大学获信息与通信工程专业博士学位. 2006 年 ~ 2007 年在美国哈佛大学做访问学者. 主要研究方向包括无线通信技术、无线传感器网络、医学图像处理等.

E-mail: enqdong@sdu.edu.cn